

Formation of Magnetic-Tower Jets in Accretion Disks around Black Holes

○ 加藤成晃 (京大基研), 嶺重慎 (京大基研), 柴田一成 (京大花山)

Yoshiaki KATO*, Shin MINESHIGE*, and Kazunari SHIBATA**

*Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan

**Kwasan Observatory, Kyoto University, Kyoto 464-8603, Japan

We studied accretion flows and outflows around black holes (BHs) by means of three-dimensional global magnetohydrodynamic (MHD) simulations. General relativistic effects are simulated by using the pseudo-Newtonian potential. We started the calculations with a rotating torus permeated by localized poloidal magnetic fields with plasma- β , a ratio of the gas pressure to the magnetic pressure, $\beta = 10$ and 100. We found that a magnetically driven jet emerges from the innermost region of the dynamo-active accretion disks close to the BHs. This MHD jet is generated by vertically inflating toroidal fields (so-called a magnetic-tower jet). The maximum velocity of the jet is about 30% of the speed of light. The magnetic-tower jet collimates at the radius where the magnetic pressure of the tower is balanced with the external pressure.

1. はじめに

X線連星系や活動銀河中心のブラックホール候補天体は、いずれも極めて高エネルギーに到る幅広い波長域での放射、激しい光度変動、複雑なスペクトル変動を示す。これは、ブラックホールの強い重力に引き込まれつつある降着流の中で、磁場・物質・放射が電磁力相互作用によって空間的にも時間的にも入り乱れ、エネルギーを交換した結果であると考えられる。しかしながら、複雑に絡み合う物理過程の理解には、まだほとんど手が付けられていないと云っても過言でもない。また、ブラックホールに落ち込むガスの一部は、相対論的ジェットという形で放出する。この宇宙ジェットの噴出メカニズムの謎は、観測でその詳細が明らかにされるにつれ、噴出、コリメーション、そして加速のメカニズムの理論的解明が鮮明な課題となってきた。

近年、降着円盤内部で磁気回転不安定性¹⁾が成長し、重力エネルギーが磁気エネルギーに転換した結果、磁気乱流が励起されて角運動量輸送効率を高めることが明らかになった。以後、磁場がブラックホール降着流や宇宙ジェットのダイナミクスを理解する鍵であるという認識が広がり、世界各地で磁気流体力学 (MHD) 研究が進められている。

しかし、これまでの研究は、無限に広がる大局的な磁場に貫かれた円盤から噴出する磁気流体ジェットか、局所磁場が埋め込まれた円盤がブラックホールへ流入する降着流自体に焦点を絞るかのどちらかであると云っている。ところが、肝心の大局磁場の起源については未解決であり、局所磁場を持つ円盤からのジェットの形成の可否は明確にされていない。そこで我々は、大局磁場が無くても、円盤内部で生成・増幅された局所磁場によって噴出する、新しいタイプのジェットの研究^{2,3)}に着手した。

我々は、磁気タワー型宇宙ジェットという新しいタイプのジェットの、世界で初めて示した、3次元磁気流体シミュレーションを紹介する。

2. 計算内容とモデル

本研究では、円筒座標系 (r, ϕ, z) における散逸性磁気流体方程式を取り扱う。ブラックホール近傍における一般相対論的效果を導入する為、擬ニュートンポテンシャル⁷⁾, $\psi = -GM/(R - r_s)$, ここで $R \equiv (r^2 + z^2)^{1/2}$ は中心からの距離、

$r_s \equiv [2GM/c^2]$ はシュバルツシルト半径 (尚、 M と c はブラックホールの質量と光速を表す) を用いる。保存形式の基礎方程式は以下の通り、

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot \left(\rho \mathbf{v} \mathbf{v} - \frac{B\mathbf{B}}{4\pi} \right) = -\nabla \left(p + \frac{B^2}{8\pi} \right) - \rho \nabla \psi, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\varepsilon + \frac{B^2}{8\pi} \right) + \nabla \cdot \left[(\varepsilon + p) \mathbf{v} + \frac{c(\mathbf{E} \times \mathbf{B})}{4\pi} \right] = -\rho \mathbf{v} \cdot \nabla \psi, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -c \nabla \times \mathbf{E} \quad (4)$$

ここで、 $\varepsilon = \rho v^2/2 + p/(\gamma - 1)$ はガスのエネルギー、 $\mathbf{E} = -(\mathbf{v}/c) \times \mathbf{B} + (4\pi\eta/c^2)\mathbf{J}$ はオームの法則、 $\mathbf{J} = (c/4\pi)\nabla \times \mathbf{B}$ は電流密度を表す。断熱係数 $\gamma = 5/3$ とする。電気抵抗 η は、太陽フレアのシミュレーションで良い近似を与える異常抵抗モデル¹⁰⁾を採用する。

我々は、ブラックホール周辺にある静水圧平衡状態の回転トーラスを初期条件とする。初期磁場構造は、トーラスの密度等値面に沿った子午面 (ポロイダル) 磁場を仮定し、トーラスの最大密度の 0.1 % 以上の領域に閉じ込められているとする。磁場強度はトーラス内部のプラズマ β (ガス圧と磁気圧の比) でパラメータ化し、弱い磁場 ($\beta = 10, 100$) を仮定する (Fig. 1)。

このようにトーラスの中に閉じ込められた弱いポロイダル磁場が、差動回転や磁気不安定性により、どのように時間発展するかを調べる。この為、我々は、Modified Lax-Wendroff 法⁹⁾と人工粘性⁸⁾を用いた空間・時間共に2次精度の3次元 MHD コードで、前述の基礎方程式を数値的に解く。メッシュ数は、 $(N_r, N_\phi, N_z) = (200, 32, 200)$ を使い、メッシュ間隔はブラックホール近傍から遠方へ離れるに従って広がる非一様メッシュを採用する。全計算領域は、 $2r_s \leq r \leq 200r_s$, $0 \leq \phi \leq 2\pi$, $0r_s \leq z \leq 200r_s$ である。

3. 計算結果

初期トーラス内部で、磁気回転不安定性によりポロイダル磁場が変形し、さらに強い差動回転によって、ポロイダル磁

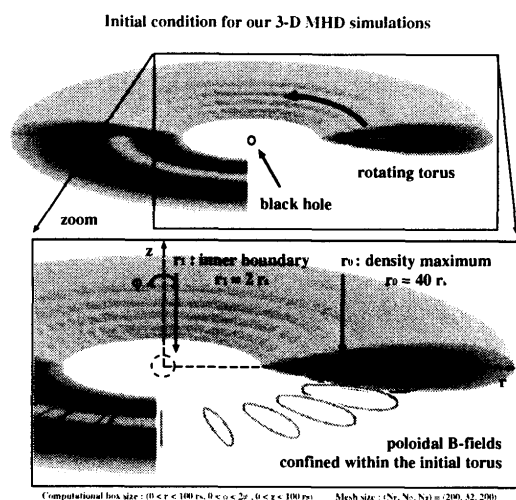


Fig.1 Initial model of our simulations. See Kato, Mineshige, and Shibata (2004) for more detail^[3].



Fig.2 Formation of a magnetic tower jet.

場が引きのぼされて方位角方向(トロイダル)磁場が作られる。そのトロイダル磁場は、ぎりぎり巻きになって、降着円盤内部に蓄積される。その結果、強い磁気応力によって角運動量が外側へ輸送され、トーラスの内側が角運動量を失ってブラックホールへ落ち込み、降着円盤を形成した。円盤内縁がブラックホール近傍に達すると、円盤内縁付近から磁気圧によってトロイダル磁場がバネのように弾けて磁気タワー(magnetic-tower)を形成した(Fig. 2)。これが磁気タワー型宇宙ジェットである。このジェットの噴出速度は、磁気タワー内部のアルフベン速度 $v_A = B/\sqrt{4\pi\rho}$ に相当する光速の 30% 程度であることが分かった。また磁気タワーの動径方向に加わる力の分布を調べた所、磁気タワーの外縁では、周囲にあるコロナのガス圧力と磁気タワーの磁気圧力が、つり合っていることも分かった。

4. まとめと議論

本研究では、局所的な弱い磁場を初期条件としても、円盤内部で生成・増幅した磁場によって磁気タワーが噴出するという、初期磁場構造に依存しない新しいタイプの MHD ジェットを示すことに成功した。

初期磁場に依存せず、ダイナモ(磁場が生成・増幅されること)が活発な円盤からジェットが噴出する為、この磁気タワー型宇宙ジェットモデルは、降着円盤を持つ全ての天体に適用できる。即ち、活動銀河核やマイクロクエーサー等、様々な空間スケールを持つ宇宙ジェットの噴出メカニズムを、磁場構造を仮定することなく説明できるものであり、宇宙ジェットの理論研究における意義は非常に大きい。因みに、ジェットが噴出した結果として大局磁場が形成される為、従来の大局磁場ジェットモデルは、磁気タワーが噴出した後の降着円盤に適用できる可能性を示唆している。

ジェット研究における主な理論的課題は、(1) ジェットの噴出機構、(2) ジェットを絞る機構(コリメーション)、(3) ジェットを相対論的な速度まで加速する機構である。

本研究は、(1) 円盤内部のダイナモで作られた局所的に強い磁場が、円盤表面まで浮上し、磁気圧で膨張することによって、磁気タワー型ジェットが噴出することを明らかにした。円盤内部の磁場が、磁気浮力で円盤表面まで到達し、円盤表面から噴出するには、円盤や円盤コロナのガス圧と同程度か、それより大きい磁気圧を持つ、強い磁場が作られなくてはならない。即ち、円盤と円盤コロナの物理状態がジェットの有無を決定するのである。(2) 円盤から噴出した磁場は円盤周囲のコロナ(円盤コロナ)との圧力平衡になるまで膨張する為、ジェットが円盤コロナの圧力でコリメーションすることを示した。ジェットの太さが円盤コロナの圧力に依存することは、従来の MHD ジェットモデルを大幅に修正するものである。尚、これは Lynden-Bell & Boily (1994)^[4] や Lynden-Bell (1996, 2003)^[5,6] が提唱した磁気タワーという概念と整合している。(3) 磁気タワーのアルフベン速度(今回は、光速の 30% 程度)まで加速されることを明らかにした。加えて、磁気タワーという形でポインティングフラックスを噴出することも重要な特徴である。

本研究では、根拠に乏しい初期磁場構造を仮定せずとも、磁気タワー型宇宙ジェットが、X 線連星のジェットの噴出速度に相当する光速の 30% 程度のジェットが噴出できることを示した。今後、光速に近い速度を持つ活動銀河中心のジェットを明らかにする為に、一般相対論的な MHD 計算へ発展させる。

引用文献

- Balbus, S. A. & Hawley, J. F., *ApJ* 376 (1991) 214-222
- Kato, Y., Hayashi, M. R., and Matsumoto, R., *ApJ* 600 (2004) 338-342
- Kato, Y., Mineshige, S., and Shibata, K., *ApJ* 605 (2004) 307-320
- Lynden-Bell, D., & Boily, C. *MNRAS* 267 (1994) 146-152
- Lynden-Bell, D. *MNRAS* 279 (1996) 389-401
- Lynden-Bell, D. *MNRAS* 341 (2003) 1360-1372
- Paczynski, B. and Wiita, P. J., *A & A* 88 (1980) 23-31
- Richtmyer, R. D. & Morton, K. W., *Interscience Tracts in Pure and Applied Mathematics*, (New York: Interscience, 1967) 2nd ed., chap. 13
- Rubin, E.L. & Burstein, S.Z., *J. Comp. Phys.* 2 (1967) 178
- Yokoyama, T. & Shibata, K., *ApJ* 436 (1994) L197-L200